

УДК 621.316.722.1

І.А. Курило, В.П. Грудська

## ОСОБЛИВОСТІ СИСТЕМИ РЕГУЛЮВАННЯ НАПРУГИ З ВОЛЬТОДОДАТКОВИМ ТРАНСФОРМАТОРОМ, КОМУТОВАНИМ ВЕНТИЛЯМИ

The article considers the operating conditions of the valve commutated booster transformer intended for high-speed stepless three-phase voltage control. It is shown that in the case of the uncoordinated supply of control pulses determining the exact moments at which the valves come into action the appearance of unallowable voltage or current values is possible.

### Вступ

Коливання навантаження в електричних розподільних мережах, а також інші причини, пов'язані з параметрами і режимами мереж, призводять до відхилення напруги кінцевих споживачів від номінального значення. Це негативно впливає на їх продуктивність і економічність використання. Для підтримання напруги споживача в межах нормованих відхилень застосовують спеціальні схеми живлення, які забезпечують можливість дискретного чи неперервного регулювання напруги. Окремі технологічні процеси, наприклад, електрографіація, вирощування монокристалів напівпровідникових матеріалів, зонне плавлення тощо, потребують регулювання напруги за певним законом. Перспективним напрямом розвитку систем регулювання змінної напруги є застосування схемотехнічних рішень силової напівпровідникової перетворювальної техніки, серед яких відомі регулятори змінної напруги (РЗН) на основі: трансформаторно-ключових виконавчих структур [1]; вентильно-дросельних блоків [2]; вентильних керованих мостів, коло постійного струму яких містить дросель з дискретно змінюваною кількістю витків [3]; систем з високочастотною широтно-імпульсною модуляцією [4]; систем з подвійним перетворенням енергії (випрямлення–інвертування) [5]. Кожен з перелічених типів має свої переваги й недоліки, але жоден з них повністю не вирішує проблему створення надійного та економічного РЗН, який би забезпечував плавність регулювання вихідної напруги у поєднанні з добрими динамічними показниками і електромагнітною сумісністю з мережею живлення.

### Постановка задачі

Мета статті — дослідити особливості роботи вольтододаткових трансформаторів (ВДТ), первинна обмотка яких комутується керовани-

ми вентилями, у двох режимах — додатного та від'ємного вольтододатка, а також сформулювати вимоги, які має задовольняти система керування вентилями для забезпечення надійного регулювання рівня фазних напруг або їх симетрування у випадку несиметричного навантаження.

### Матеріал і результати досліджень

Регулювання змінної напруги за допомогою вольтододаткових трансформаторів, первинна обмотка яких комутується напівпровідниковими керованими вентилями (тиристорами, симісторами, IGBT-транзисторами), має ряд переваг над іншими способами регулювання. Зокрема, порівняно з фазовим безтрансформаторним регулюванням системи регулювання з ВДТ вимагають меншої встановленої потужності вентилів і характеризуються більш високим коефіцієнтом потужності, оскільки фазовий зсув впливає лише на відносно невелику частину вхідного струму. Ці переваги тим суттєвіші, чим більший коефіцієнт трансформації ВДТ, тобто чим менший діапазон регулювання (до 15–20 %).

На рис. 1 показано систему регулювання змінної напруги, побудовану на керованих тиристорами ВДТ, яка дає можливість не тільки плавно змінювати значення фазних напруг трифазного споживача, а й симетрувати ці напруги. Така система може бути використана для стабілізації параметрів якості електроенергії в трифазних розподільних мережах з несиметричним навантаженням.

Незалежне регулювання напруги в кожній фазі реалізується за рахунок використання трьох однофазних ВДТ у системі з нульовим проводом. Алгоритм керування вентилями та ввімкнення обмоток ВДТ визначають режим його роботи — від'ємний або додатний вольтододаток.



$$= \sqrt{\frac{U_{mm}^2}{\pi} \left[ \int_0^{\alpha} \sin^2 \vartheta d\vartheta + \int_{\alpha}^{\pi} \left(1 + \frac{1}{n}\right)^2 \sin^2 \vartheta d\vartheta \right]} =$$

$$= U_m \sqrt{\left(1 + \frac{1}{n}\right)^2 + \left[1 - \left(1 + \frac{1}{n}\right)^2\right] \left(\frac{\alpha}{\pi} - \frac{\sin 2\alpha}{2\pi}\right)}.$$

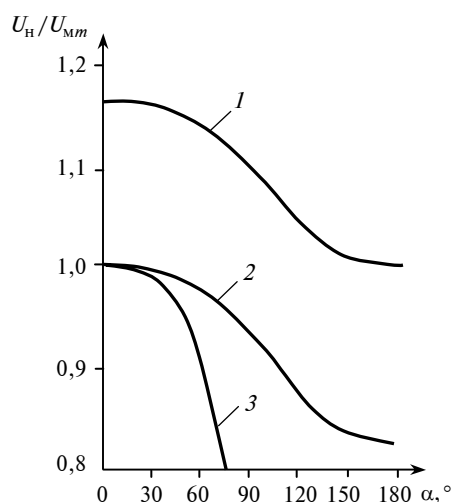


Рис. 2. Регульовальні характеристики системи

На рис. 2 також показано відносне значення напруги на навантаженні при фазовому регулюванні (крива 3).

Для надійної роботи системи, зображеної на рис. 1, необхідне узгоджене керування тиристорами – тиристор, у якого кут регулювання  $\alpha = 0$ , має відкриватися в момент виходу з роботи тиристора, що працює із заданим кутом  $\alpha > 0$ .

Якщо тиристор з кутом керування  $\alpha = 0$  (непарний у режимі від'ємного і парний у режимі додатного вольтододатка) вступає в роботу при відкритому тиристорі, у якого  $\alpha > 0$ , то утворюється короткозамкнений контур зі струмом, обмеженим тільки опором мережі живлення (головним чином індуктивним) і з'єднувальних провідників. Якщо ж тиристор, у якого  $\alpha > 0$ , відкривається пізніше, ніж виходить із роботи тиристор з кутом регулювання  $\alpha > 0$ , то протягом відповідного проміжку часу первинна обмотка ВДТ виявляється розімкненою, внаслідок чого індуктивний опір вторинної обмотки різко зростає. Практично вся напруга мережі прикладена до вторинної обмотки, а миттєве значення напруги на первинній обмотці ВДТ перевищує значення миттєвої напруги мережі в  $n$  разів, що може спричинити пробивання тиристорів.

Перенапруги можуть виникати також при розбіжності кутів регулювання тиристорів. В інтервалі провідності тиристора, що працює з меншим кутом  $\alpha$ , відбувається зростання струму намагнічування  $i_0$ , внаслідок чого в режимі від'ємного вольтододатка тиристор виходить з роботи раніше, а в режимі додатного – пізніше моменту проходження через нуль фазної напруги мережі. І в першому, і в другому випадках первинна обмотка ВДТ виявляється розімкненою.

### Особливості режиму від'ємного вольтододатка

На рис. 3 показано, як змінюються поточкозчеплення, напруги і струми в одній із фаз (фазі  $A$ ) в режимі від'ємного вольтододатка для випадку  $\alpha_2 > \alpha_4$ . Графіки подані у відносних одиницях. За базисні величини покладено: амплітудні значення поточкозчеплення  $\psi_m$  і струму намагнічування  $I_{0m}$  у симетричному режимі; амплітуду фазної напруги мережі  $U_{mm}$ ; опір  $r_6 = U_{mm}/I_{0m}$ ; статичну індуктивність контуру намагнічування ВДТ при амплітудному значенні поточкозчеплення в симетричному режимі  $L_6 = \psi_m/I_{0m}$ . Осердя ВДТ виготовлене з листової холоднокатаної сталі Е-330, товщина листів становить 0,35 мм.

У розглянутому випадку ( $\alpha_2 > \alpha_4$ ) інтервал провідності тиристора  $VS_1$  більший за інтервал провідності  $VS_3$ ; тому тривалість впливу на первинну обмотку ВДТ додатної півхвилі вхідної напруги  $u_m$  більша, ніж від'ємної. Під час роботи тиристора  $VS_1$  струм намагнічування  $i_0$  досягає свого максимального значення, яке згідно з законом електромагнітної індукції залишається незмінним в інтервалі провідності тиристора  $VS_2$ , який шунтує первинну обмотку (активним опором та індуктивністю розсіювання нехтуємо). Оскільки в режимі від'ємного вольтододатка в додатний півперіод струми  $i_n$  та  $i_0$  спрямовані зустрічно, то струм тиристора  $VS_2$   $i_{VS_2} = i_1 = i_0 + \frac{1}{n} i_n$  спаде до нуля набагато раніше, ніж пройде через нуль вхідна напруга  $u_A$ . Первинна обмотка ВДТ перебуватиме в розімкненому стані до вступу в роботу чергового тиристора  $VS_3$ . На відміну від тиристора

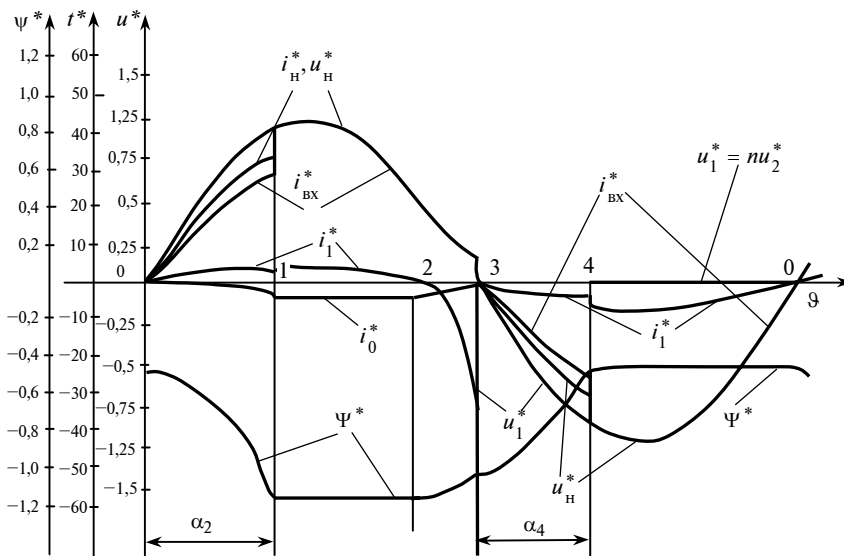


Рис. 3. Графіки миттєвих напруг і струмів фази ВДТ у режимі від'ємного вольтододатка

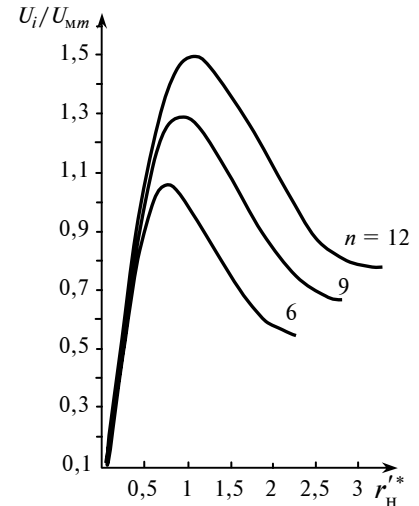


Рис. 4. Графіки перенапруг на розімкненій первинній обмотці ВДТ у режимі додатного вольтододатка

$VS_2$ , який виходить з роботи раніше, ніж напруга  $u_A$  досягає нуля, робота тиристора  $VS_4$  при малих кутах  $\alpha$  може продовжитись, оскільки в інтервалі його провідності струм намагнічування збереже від'ємне значення.

При великих значеннях кута регулювання  $\alpha_4$  можливе перемагнічення осердя, струм намагнічування  $i_0$  змінить знак, і тиристор  $VS_4$  так само, як і  $VS_2$ , вийде з роботи раніше. Однак в обох випадках струм намагнічування малий, тому вважатимемо, що тиристор  $VS_4$  виходить з роботи в момент проходження через нуль напруги мережі  $u_A$ . Таким чином, на періоді напруги живлення доцільно виділити п'ять інтервалів: інтервали 0–1 і 3–4 відповідають стану провідності тиристорів  $VS_1$  і  $VS_3$ , коли первинна обмотка ВДТ підключена до мережі; інтервали 1–2 і 4–0 відповідають стану провідності тиристорів  $VS_2$  і  $VS_4$ , коли первинна обмотка зашунтована; інтервал 2–3, в якому первинна обмотка розімкнена. За рахунок ефекту зворотної трансформації в розімкненій первинній обмотці виникає напруга, яка набуває найбільшого значення в момент вступу в роботу чергового тиристора  $VS_3$ . Розрахунки несиметричних режимів роботи у випадках зміни номінальних значень індукції  $B_m$  від 0,3 до 1,7 Тл і кута  $\alpha_2$  від 30 до 180° показали, що величина перенапруги істотно залежить від опору

навантаження, причому опір, який відповідає максимуму напруги, різний для різних значень коефіцієнта трансформації (див. рис. 4).

### Особливості режиму додатного вольтододатка

На рис. 5 показано графіки потокозчеплення, напруг і струмів у фазі  $A$  в режимі додатного вольтододатка при  $\alpha_1 > \alpha_3$ . Розрахунок виконаний у відносних одиницях; базисні величини залишились такими самими, як для від'ємного вольтододатка. Оскільки кут регулювання тиристора  $VS_3$ , який підключає первинну обмотку ВДТ до мережі, менший  $\alpha_1$ , то в інтервалі його провідності можливе сильне намагнічування трансформатора, навіть до насичення, і різке зростання струму намагнічування  $i_0$ , в якому з'являється істотна додатна складова. В результаті збільшення  $i_0$  струм працюючого тиристора  $VS_3$   $i_{VS_3} = i_0 + \frac{1}{n}i_H$  проходить через нуль значно пізніше, ніж вхідна напруга, що спричиняє продовження його роботи в область від'ємних значень прикладеної напруги. Тому за абсолютною величиною напруга на навантаженні перевищує вхідну напругу  $u_A$ . В момент виходу з роботи тиристора  $VS_3$  струм  $i_H$  і, відповідно, напруга  $u_H$  не можуть змінюватись стрибкоподібно,

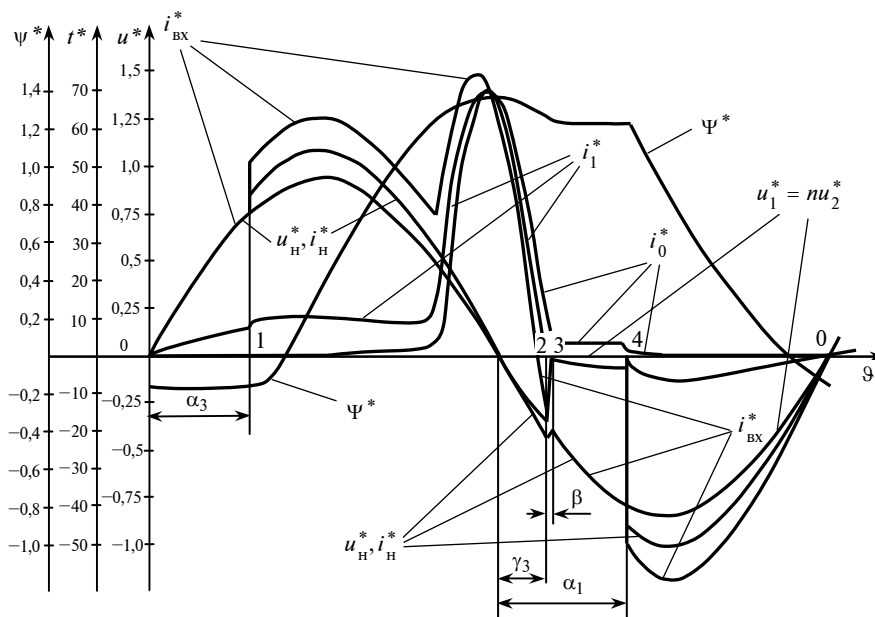


Рис. 5. Графіки миттєвих напруг і струмів фази ВДТ у режимі додатного вольтододатка

тому деякий час напруга на навантаженні залишається більшою, ніж вхідна, за абсолютною величиною.

До вторинної обмотки ВДТ прикладена від'ємна напруга, яка трансформується в первинну обмотку. На черговий тиристор  $VS_2$  діє зворотна напруга  $u_1 = n(u_H - u_A)$ , і він в роботу не вступає, поки напруга на ньому не стане рівною нулю (за умови, що тиристор  $VS_2$  буде відкритий по керуючому електроду). Таким чином, протягом певного інтервалу часу, який відповідає куту  $\beta$  на рис. 5, первинна обмотка ВДТ є розімкненою.

Тиристор  $VS_1$  може виходити з роботи дещо раніше і дещо пізніше моменту проходження через нуль напруги  $u_A$  залежно від того, чи змінює знак струм намагнічування в інтервалі провідності цього тиристора. В обох випадках первинна обмотка деякий час розімкнена. Будемо вважати, що в кінці інтервалу провідності тиристора  $VS_1$  струмом намагнічування можна знехтувати, оскільки він малий. Тоді струм працюючого тиристора  $VS_1$   $i_{VS_1} \approx \frac{1}{n} i_H$  проходить через нуль одночасно з вхідною напругою  $u_A$ . В цей же момент вступає в роботу черговий тиристор  $VS_4$ , а отже, інтервал, в якому первинна обмотка розімкнена, буде практично відсутній. Таким чином, на періоді вхідної напруги  $u_A$  можна виділити такі самі п'ять інтервалів, як і для режиму від'ємного вольтододатка. На

відміну від цього режиму, де в інтервалі 2–3 напруга на розімкненій первинній обмотці зростає від 0 до максимуму, в режимі додатного вольтододатка напруга на розімкненій обмотці швидко зменшується від свого максимального значення  $u_m = U_{mm} \sin \gamma_3$  на початку інтервалу до нуля в кінці інтервалу, оскільки в разі розмикання первинної обмотки струм і напруга на навантаженні зменшуються, а вхідна напруга  $u_A$  зростає.

Тривалість інтервалу 2–3 можна визначити, порівнюючи напруги на вході та навантаженні в кінці інтервалу. Зазвичай цей ін-

тервал дуже малий, особливо при великих значеннях коефіцієнта  $n$ . В режимі додатного вольтододатка для тиристорів небезпечна не стільки напруга на короткочасно розімкненій первинній обмотці ВДТ, як збільшення струму намагнічування, що може призвести до перевантаження струмом послідовного тиристора, який працює з меншим кутом  $\alpha$ . Оскільки виникнення інтервалу 2–3 пов'язане з асиметрією кутів регулювання, то рівняння, які описують процеси в цьому інтервалі, були використані для розрахунку струмів намагнічування в несиметричних режимах. Розрахунки виконувались з допомогою веберамперної характеристики ВДТ, апроксимованої трьома відрізками прямих для таких режимів: 1 – для робочого, 3 – для насичення, 2 – для проміжного між ними. Початок інтервалу (точка 2 на рис. 5) відповідає виходу з роботи тиристора  $VS_3$ , у якого  $\alpha_3 > 0$ , а кінець (точка 3) – вступу в роботу тиристора  $VS_2$  з кутом  $\alpha_2 = 0$ . В інтервалі 2–3 первинна обмотка розімкнена  $i_1 = \frac{1}{n} i_H + i_0 = 0$ , тому в будь-який момент часу  $i_0 = -\frac{1}{n} i_H$ . В момент закриття  $VS_3$  струм намагнічування становить

$$i_{02} = -\frac{1}{n} i_{H2} = \left(1 + \frac{1}{n}\right) \frac{U_{mm}}{nr_H} \sin \gamma_3,$$

звідки

$$\gamma_3 = \arcsin \frac{n^2 r_H i_{02}}{(n+1)U_{mm}}. \quad (1)$$

Зміна струму намагнічування  $i_0$  в інтервалі 2–3 описується виразом

$$i_0 = -\frac{1}{n} i_H = \frac{nU_{mm}}{\sqrt{(r'_H)^2 + (\omega L)^2}} \times \\ \times \sin \left( \vartheta + \gamma_3 - \arctg \frac{\omega L}{r'_H} \right) + A e^{-\frac{r'_H}{\omega L} \vartheta}, \quad (2)$$

де

$$A = \left( 1 + \frac{1}{n} \right) \frac{U_{mm}}{nr_H} \sin \gamma - \\ - \frac{nU_{mm}}{\sqrt{(r'_H)^2 + (\omega L)^2}} \sin \left( \gamma_3 - \arctg \frac{\omega L}{r'_H} \right), \quad (3)$$

$r'_H$  – опір навантаження, зведений до первинної обмотки ВДТ;  $L$  – динамічна індуктивність, яка відповідає насиченому стану ВДТ.

У кінці інтервалу, коли вступає в роботу черговий тиристор VS<sub>2</sub>, струм намагнічування визначається рівнянням

$$i_{03} = \frac{nU_{mm}}{\sqrt{(r'_H)^2 + (\omega L)^2}} \sin \left( \beta + \gamma_3 - \arctg \frac{\omega L}{r'_H} \right) + \\ + A e^{-\frac{r'_H}{\omega L} \beta}, \quad (4)$$

а потокозчеплення

$$\psi_1 = \psi_{\text{пер}} + L \cdot i_{03},$$

де  $\psi_{\text{пер}}$  – значення потокозчеплення в точці перегину апроксимованої веберамперної характеристики ВДТ.

Електричний кут  $\beta$ , який характеризує тривалість інтервалу 2–3, можна визначити, прирівнявши напруги на вході та на навантаженні в кінці цього інтервалу:

$$\frac{n^2 r_H U_{mm}}{\sqrt{(r'_H)^2 + (\omega L)^2}} \sin \left( \beta + \gamma_3 - \arctg \frac{\omega L}{r'_H} \right) + \\ + nr_H A e^{-\frac{r'_H}{\omega L} \beta} = U_{mm} \sin (\beta + \gamma_3). \quad (5)$$

Зміна потокозчеплення відбувається в інтервалах провідності непарних тиристорів, які підключають обмотку ВДТ до мережі. В інтервалах провідності парних тиристорів ця обмот-

ка зашунтована, тому потокозчеплення залишається незмінним. Тиристор VS<sub>1</sub> з кутом регулювання  $\alpha_1$  відкритий в інтервалі 4–0 ( $0 < \vartheta < \pi - \alpha_1$ ). Відповідний вираз потокозчеплення має такий вигляд:

$$\psi = \psi_3 + \int_0^t u_m dt = \psi_3 + \frac{1}{\omega} \int_0^{\vartheta} -U_{mm} \sin (\vartheta + \alpha_1) d\vartheta = \\ = \psi_3 + \psi_m [\cos (\alpha_1 + \vartheta) - \cos \alpha_1].$$

Припускаючи, що тиристор VS<sub>1</sub> закривається в момент проходження фазної напруги мережі через нуль, потокозчеплення в кінці цього інтервалу можна визначити як  $\psi_0 = \psi_3 - \psi_m (1 + \cos \alpha_1)$ . Тиристор VS<sub>3</sub> з кутом регулювання  $\alpha_3$  відкритий в інтервалі 1–2 ( $0 < \vartheta < \pi - \alpha_3 + \gamma_3$ ). Зміна потокозчеплення в цьому інтервалі описується рівнянням

$$\psi = \psi_0 + \int_0^t u_m dt = \psi_0 + \frac{1}{\omega} \int_0^{\vartheta} U_{mm} \sin (\vartheta + \alpha_3) d\vartheta = \\ = \psi_0 - \psi_m [\cos (\alpha_3 + \vartheta) - \cos \alpha_3].$$

В кінці інтервалу, тобто в момент розмикання первинної обмотки, отримаємо

$$\psi_2 = \psi_0 + \psi_m (\cos \gamma_3 + \cos \alpha_3) = \\ = \psi_3 + \psi_m (\cos \gamma_3 + \cos \alpha_3 - \cos \alpha_1 - 1).$$

Для магнітної індукції осердя ВДТ це рівняння можна записати так:

$$B_2 = B_3 + B_m (\cos \gamma_3 + \cos \alpha_3 - \cos \alpha_1 - 1). \quad (6)$$

Задаючи значення  $B_2$ ,  $B_m$ ,  $r_H$ , коефіцієнт трансформації  $n$  і кут регулювання одного тиристора  $\alpha_1$ , можна з рівняння (1) визначити кут  $\gamma_3$ ; з рівнянь (3) і (5) – тривалість інтервалу 2–3; з рівняння (4) – струм намагнічування в кінці інтервалу і відповідну магнітну індукцію  $B_3$ ; з рівняння (6) – кут регулювання  $\alpha_3$  і потім розбіжність кутів  $\Delta \alpha = \alpha_1 - \alpha_3$ . Максимальне значення магнітної індукції  $B_{\text{max}} = B_2 + B_m (1 - \cos \gamma_3)$  спостерігається в інтервалі 1–2 при  $\vartheta = \pi - \alpha_3$ . Для значень  $B_{\text{max}}$  і  $B_m$  за кривою намагнічування сталі Е-330 можна знайти відповідні значення  $H_{\text{max}}$  та  $H_m$  і на підставі закону повного струму розрахувати відношення  $\frac{H_{\text{max}}}{H_m} = \frac{i_{0\text{max}}}{I_{0m}}$ . Описаним вище способом було

виконано розрахунок струмів намагнічування у випадку активного навантаження  $r_n = 1 \text{ Ом}$ . Магнітна індукція  $B_m$  змінювалася від 0,3 до 1,7 Тл, початкові значення індукції  $B_2$  вибиралися від 1,1 до 1,72 Тл, кут регулювання  $\alpha_1$  варіювався в межах від  $30^\circ$  до  $180^\circ$ .

На рис. 6 подано результати розрахунків для  $B_m = 1,3 \text{ Тл}$ .

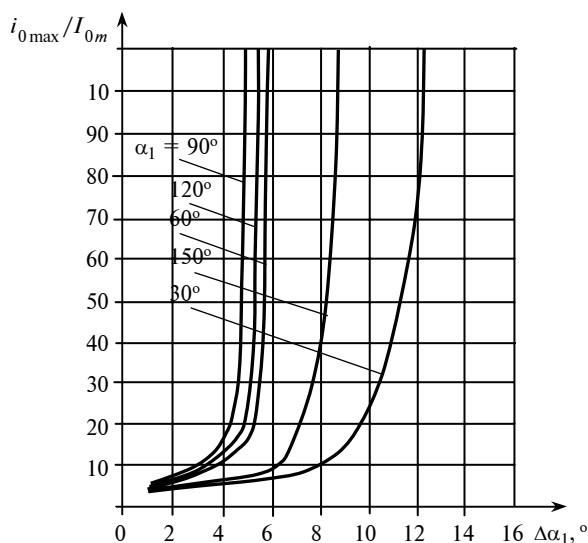


Рис. 6. Графіки відносних значень струмів намагнічування фази ВДТ у режимі додатного вольтододатка

Встановлено, що асиметрія кутів регулювання  $\Delta\alpha > 5^\circ$  призводить до збільшення струму намагнічування в десятки разів, причому найбільше його зростання відбувається в діапазоні кутів регулювання  $30^\circ < \alpha < 150^\circ$  і при значеннях  $B_m < 1,5 \text{ Тл}$ .

Крім того, що у випадку асиметрії кутів регулювання  $\alpha$  струм намагнічування може набувати значень, небезпечних для тиристорів, його різке зростання спричиняє таке саме зростання вхідного струму, оскільки в режимі додатного вольтододатка вхідний струм дорівнює сумі струмів обмоток ВДТ. У результаті фаза мережі буде перевантаженою і може виникнути спад напруги, який негативно вплине на роботу як самої системи регулювання, так і інших споживачів, що живляться від цієї мережі.

### Особливості системи без нульового проводу

При відсутності нульового проводу існує взаємний вплив фаз, внаслідок чого відбувається додаткове спотворення напруг і струмів. Розрахунок такої системи зводиться до розрахунку трифазного кола, в якому діють несиметричні фазні напруги  $u'_A, u'_B, u'_C$ , оскільки в будь-який момент часу або в одній з фаз, або одночасно в двох фазах проявляється дія ВДТ. За півперіод напруги живлення можна виділити у разі симетричного навантаження дві ділянки, у випадку несиметричного — шість ділянок, кожна з яких характеризується певною сукупністю значень  $u'_A, u'_B, u'_C$  залежно від того, в якій із фаз проявляється дія ВДТ. Струми і напруги кожної ділянки визначаються відомими методами розрахунку несиметричного трифазного кола. На рис. 7 зображено графіки напруг і струмів у фазі А, розраховані для режиму від'ємного вольтододатка у випадку  $n = 6$ ,  $\alpha = 90^\circ$  і несиметричного активного навантаження  $r_A = 1,5r_B = 1,5r_C$ . Розрахунки показали, що фазні напруги на навантаженні, як правило, зсунуті в часі відносно фазних напруг мережі. Цей зсув проявляється, зокрема, під час проходження фазних напруг через нуль. Узгоджене керування тиристорами дасть можливість запобігти появі короткозамкнених контурів через одночасно працюючі парні та непарні тиристори або виникненню перенапруги на розімкненій первинній обмотці ВДТ.

Рис. 7. Графіки миттєвих напруг і струмів фази ВДТ при відсутності нульового проводу ( $u_k$  — керуючий імпульс)

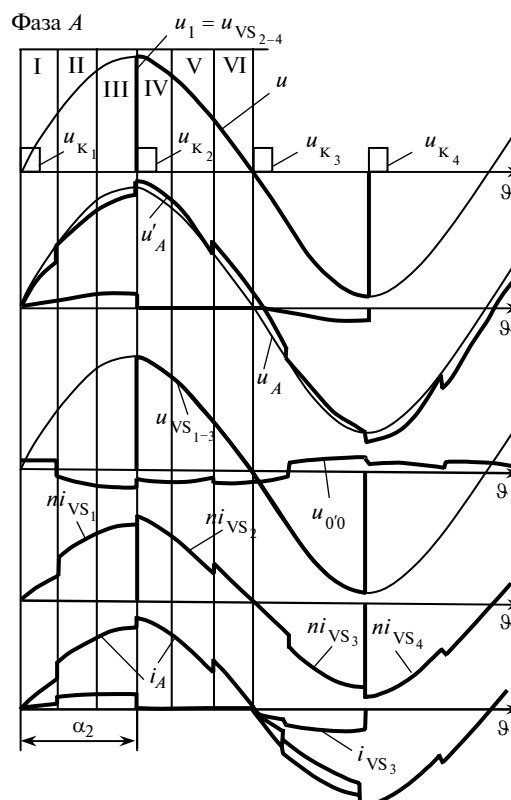


Рис. 7. Графіки миттєвих напруг і струмів фази ВДТ при відсутності нульового проводу ( $u_k$  — керуючий імпульс)

### Висновки

Проведений аналіз особливостей роботи ВДТ, первинна обмотка яких комутується вентилями, дав змогу сформулювати вимоги до системи керування вентилями для забезпечення надійної роботи ВДТ: вентиля, кут керування яких  $\alpha = 0$ , мають вступати в роботу одночасно із закриттям вентилів, працюючих з кутом  $\alpha > 0$ ; для вентилів, що працюють з кутом керування  $\alpha > 0$ , не припустима асиметрія кутів  $\Delta\alpha$ , більша за  $3\text{--}5^\circ$ .

Регулювання діючого значення напруги супроводжується певними спотвореннями синусоїдних струмів і напруг. Для визначення перспектив і сфер застосування систем регулювання з ВДТ, керованих вентилями, в подальших дослідженнях необхідно отримати кількісні оцінки показників електромагнітної сумісності системи з мережею живлення і навантаженням.

1. *Липковский К.А.* Трансформаторно-ключевые исполнительные структуры преобразователей переменного напряжения. — К.: Наук. думка, 1983. — 214 с.
2. *Такеути Т.* Теория и применение вентильных цепей для регулирования двигателей. — М.: Энергия, 1973. — 248 с.
3. *Чиженко А.Н., Курило І.А.* Управление вентильным регулятором переменного напряжения // Техн. електродинаміка. — 2008. — № 6. — С. 36–41.
4. *Макаренко М.П.* Напівпровідникові перетворювачі модуляційного типу (системне моделювання, аналіз електромагнітних процесів) // Автореф. дис. ... д-ра техн. наук: 05.09.12; Ін-т електродинаміки НАН України. — К., 2003. — 37 с.
5. *Кузнецов В.Г.* Устройства повышения качества электрической энергии в низковольтных сетях с нулевым проводом // Электричество. — 1978. — № 10. — С. 6–10.

Рекомендована Радою  
факультету електроенерготехніки  
та автоматики НТУУ “КПІ”

Надійшла до редакції  
21 лютого 2011 року